



## PROYECTO FINAL DE CARRERA

# DISEÑO Y ANÁLISIS MATEMÁTICO DE UN MOTOR ROTATIVO TOROIDAL

JAVIER GALDEANO GALDEANO  
INGENIERÍA MECÁNICA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MEXICO

# INDICE

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO: IDEA PRINCIPAL DEL DISEÑO.  
APLICACIONES. ANTECEDENTES DEL DISEÑO.

METODOLOGÍA Y EJECUCIÓN: CONSIDERACIONES TEÓRICAS.  
SOFTWARE Y MEDIOS A UTILIZAR. MODELO TEÓRICO ELEGIDO.  
MEJORAS EN EL DISEÑO.

## **CAPÍTULO I DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DISEÑO**

PIEZAS UTILIZADAS. GEOMETRÍA

FUNCIONAMIENTO

FASES Y PROCESOS

ELEMENTOS AUXILIARES. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN

MATERIALES UTILIZADOS Y ESTADO SUPERFICIAL

COMBUSTIBLES Y RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE

## **CAPÍTULO II CONSIDERACIONES TEÓRICAS Y DE CÁLCULO**

ESTUDIO ENERGÉTICO

ESTUDIO DE PÉRDIDAS

## **CAPÍTULO III ANÁLISIS MATEMÁTICO**

EC. FUNDAMENTALES EN EL ESTUDIO DE FUNCIONAMIENTO Y  
CONDICIONES DEL MOTOR.

## **CAPÍTULO IV CONCLUSIONES**

# PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

Se pretende hacer un diseño de un motor rotativo que fusiona el principio de funcionamiento de las máquinas térmicas alternativas y el de las rotativas. el paso siguiente, consiste en llevar el diseño teórico al plano analítico, y tratar de hallar las ecuaciones que respondan al comportamiento aproximado del diseño en condiciones de funcionamiento. Se partirá de las ecuaciones que siguen el funcionamiento de un motor alternativo, y se modificarán estas en la medida de lo posible o se sustituirán por otras diferentes. Se espera obtener una serie de conclusiones en forma de resultados matemáticos, que reflejen rendimiento y otras características, que junto a costos constructivos y otros factores no considerados en el cálculo, van a proporcionar una idea sobre la viabilidad del motor.

De igual manera, se va a comparar el funcionamiento de este diseño con los de otras máquinas térmicas como son los motores de combustión interna alternativos y turbinas de gas.

Tras el diseño conceptual del motor, conociendo de forma detallada las dimensiones, normas y procesos, se procederá al análisis matemático y físico, teniendo en cuenta que se trata de buscar la aproximación analítica más adecuada. Para la realización del proyecto, se utilizarán programas de computación tales como Microsoft office, Solid Works y Autocad. Como apoyo en la investigación analítica, se utilizará una tesis de maestría realizada por un alumno de la facultad de ingeniería de la UNAM. El título de esta tesis es “modelos de llenado vaciado en motores de combustión interna” el objetivo es recurrir a las fórmulas que se utilizan en el estudio de un motor alternativo y adecuarlas para el diseño propuesto. El modelo será el de llenado vaciado, no muy exacto en la aproximación pero debido a que en él se obvian diferentes aspectos tanto teóricos como prácticos, se pueden simplificar los cálculos y ecuaciones en gran medida.

Para hallar funciones matemáticas que relacionen variables, tales como el volumen de la cámara de combustión, se utilizó un software llamado Mathematica de cálculo analítico. Fue fundamental para la determinación de las curvas para cada tipo de combustible en la demostración llevada a cabo más adelante, ya que se representaron en él para obtener una idea de su forma aproximada.

Como antecedentes del diseño, destaca el motor pendular Taurozzi. La principal similitud es la forma toroidal del espacio en el que se lleva a cabo la combustión, aunque son más las diferencias. En lugar de álabes tiene pistones que se desplazan relativos unos a otro separándose o acercándose según la secuencia de funcionamiento, y la transmisión al eje es mucho más compleja. Una imagen:



# METODOLOGÍA Y EJECUCIÓN

Se comenzará el estudio elaborando un diseño conceptual completo del motor. Tienen especial importancia las dimensiones y parámetros que sean imprescindibles para estudiar el funcionamiento del motor. Destacan el volumen de la cámara de combustión, la velocidad de giro, la masa de mezcla aire-combustible o el ángulo de giro. Estas variables podrán expresarse en función de otras, simplificando de esta manera los cálculos.

Las dimensiones de las piezas tendrán valores redondos, múltiplos de 5 o de 10, de igual manera para facilitar los cálculos y obtener resultados mas sencillos. El material del que se vaya a construir el motor no tendrá influencia en el estudio, ya que el modelo teórico en el que se basa no tiene en cuenta rozamientos ni contrapresiones. Por esta razón, el hecho de que con un material utilizado se obtenga un rozamiento mayor o menor es irrelevante. Las dimensiones del motor serán pequeñas, ya que para que el modelo teórico elegido sea válido, el volumen de la cámara de combustión debe ser pequeño.

Todas las variables que surjan del nuevo motor se llevarán al estudio analítico, y se obtendrán unas ecuaciones finales diferentes de las que se utilizan en motores alternativos, suponiendo un funcionamiento muy teórico e ideal del motor. El análisis podría ser más exacto, pero también sería más complicado de realizar, y se necesitaría software más avanzado tecnológicamente.

Una vez conocidos los resultados, se analizarán conclusiones, analizando las posibles aplicaciones que pudiese tener el diseño.

El objetivo de este proyecto es avanzar en el estudio de un nuevo motor, dejando el camino abierto para futuras investigaciones. se pretende demostrar la similitud con los motores de combustión alternativa, tanto a nivel funcional como analítica. Por tanto no se van a obtener resultados de forma numérica pero sí una serie de conclusiones que orientarán los próximos estudios, relativos este diseño, que se lleven a cabo.

# CAPÍTULO I

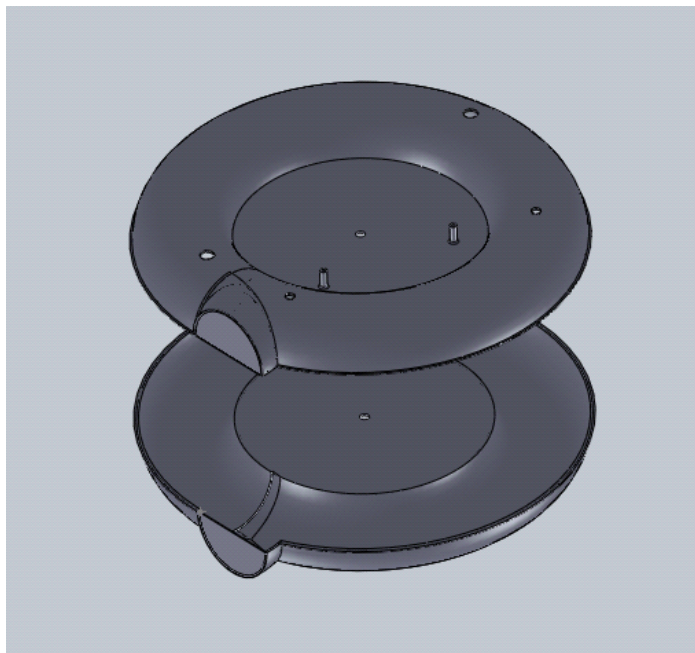
## DESCRIPCIÓN GRAL. DEL DISEÑO

### PIEZAS UTILIZADAS. GEOMETRÍA

El diseño del motor consiste en dos carcassas, una superior y otra inferior, que forman un espacio toroidal. Dentro de este va a tener lugar la combustión del gas, y una pieza interior provista de álabes transformará la energía interna del fluido en energía mecánica en el eje. Esta pieza se coloca dentro de las dos carcassas de manera concéntrica.

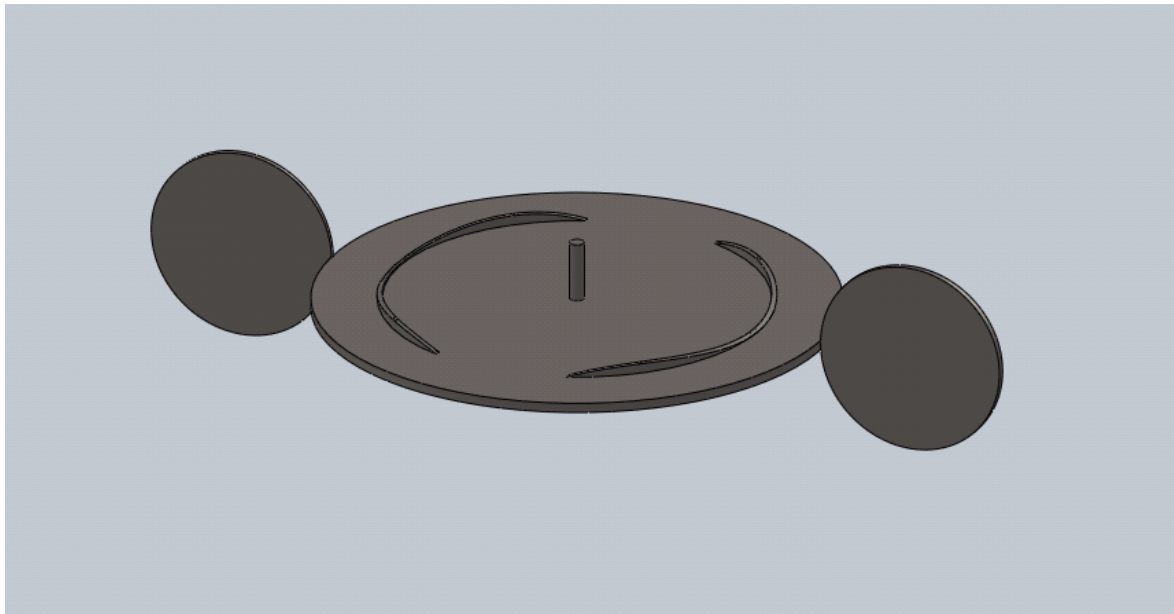
Las dos piezas exteriores que forman la carcassa están unidas por pernos, que se colocan en las pestañas exteriores de estas. La carcassa es la pieza que va anclada a la bancada o a los cimientos en el suelo, asegurando la sujeción del motor.

CARCASAS



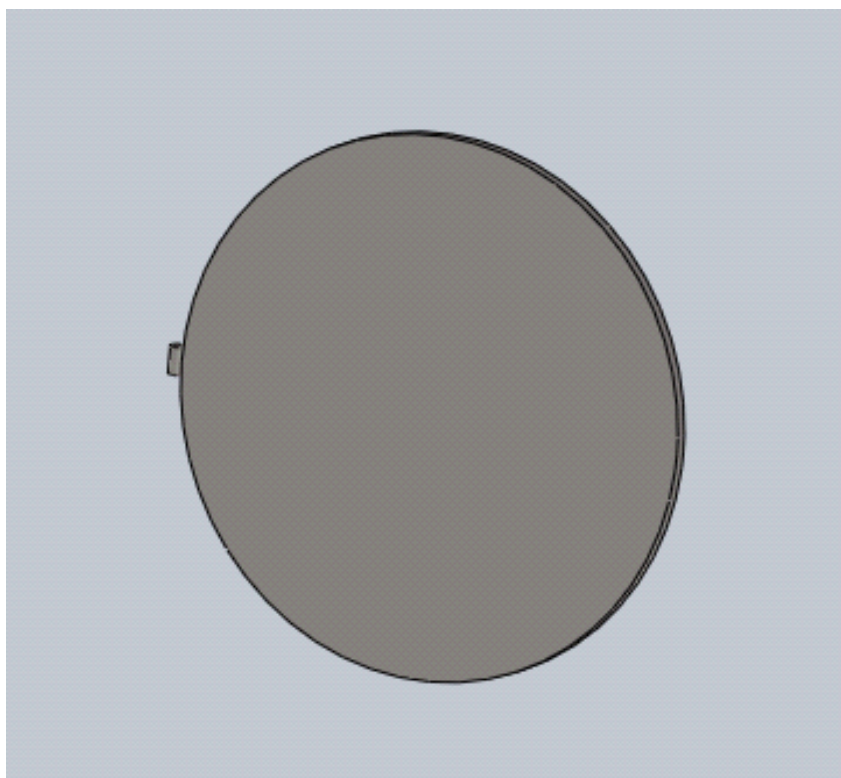
La pieza interior, consiste en dos álabes y un disco. El disco tiene relieve que actuará como leva para la secuencia de abierto-cerrado de las válvulas. También tiene la función de volante de inercia, por ser macizo y tener una masa elevada. Esta pieza también tiene la función de transferir el movimiento al generador eléctrico o a una caja de velocidades, descansa dentro de la carcasa y el eje está sujeto por cojinetes y rodamientos.

### PIEZA INTERIOR

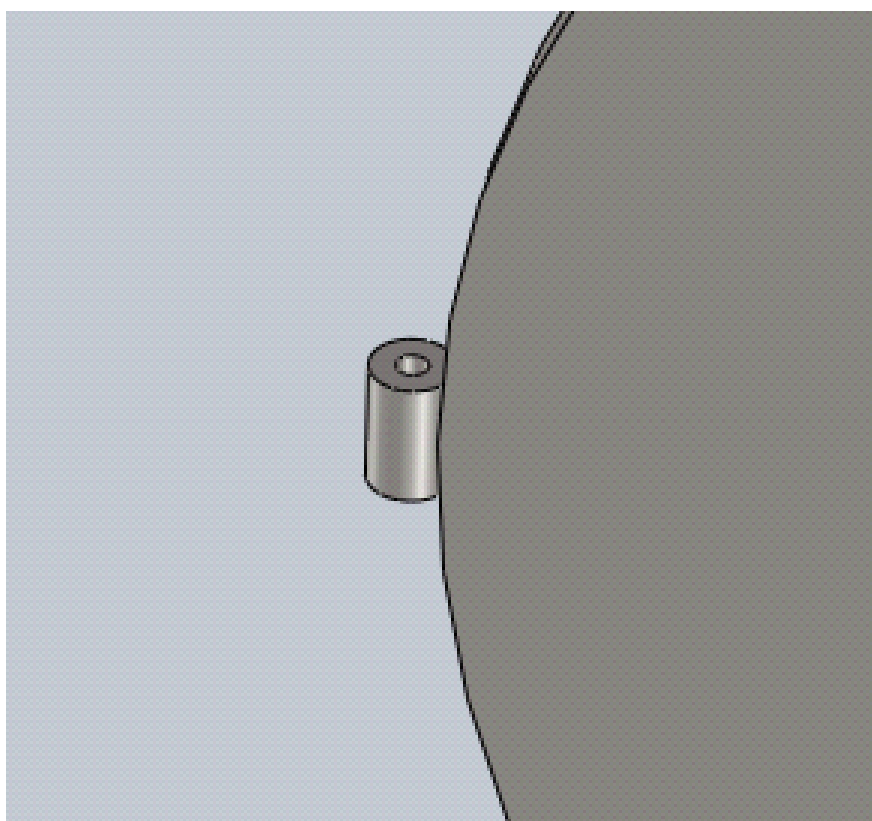


La cámara de combustión tiene volumen variable. Este aumenta a medida que se incrementa el ángulo de giro, que es el avance que lleva el álabe desde la referencia en la articulación de la aleta móvil.

La aleta móvil es una pieza que permite el paso de los álabes, gira alrededor de un bulón volviendo a su posición original cuando el álabe ha pasado. Esta gira porque la desplaza el álabe. El retorno a su posición original se debe a un resorte en dicha articulación.



DETALLE DE LA ALETA MÓVIL

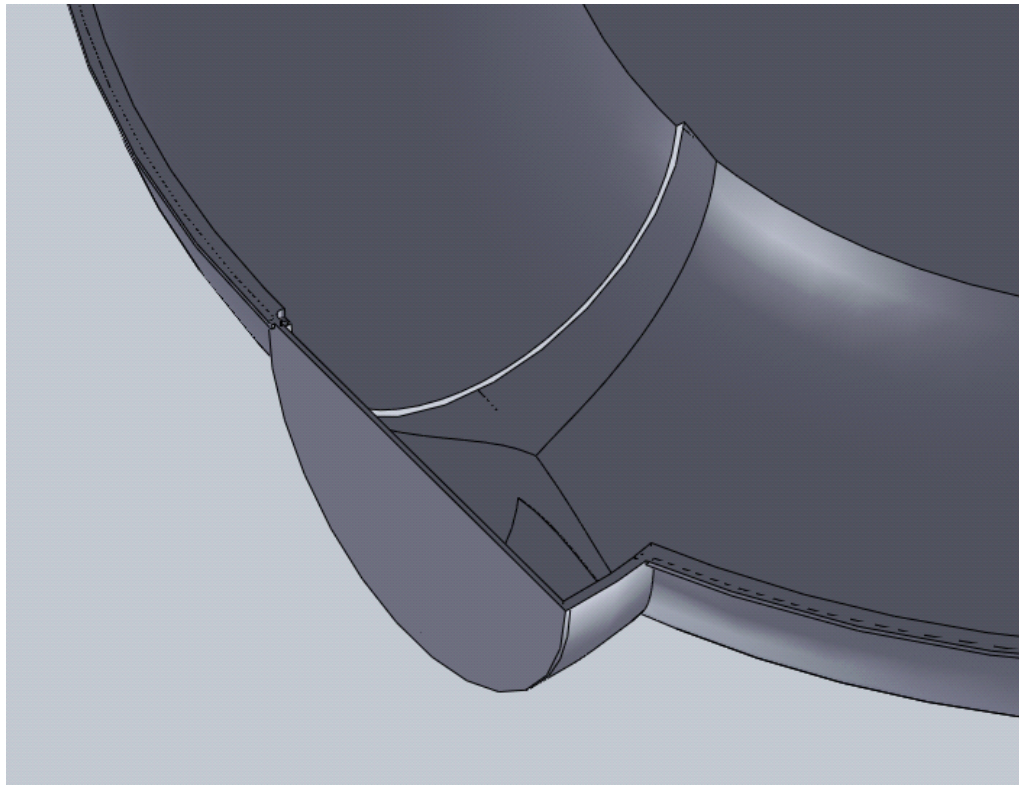




Para un correcto sellado de la combustión, se mecaniza en la carcasa un rebaje que será necesario para hacer de tope a la aleta móvil. Sin este elemento, la aleta móvil cedería en la combustión haciendo imposible la obtención de energía mecánica en el eje.

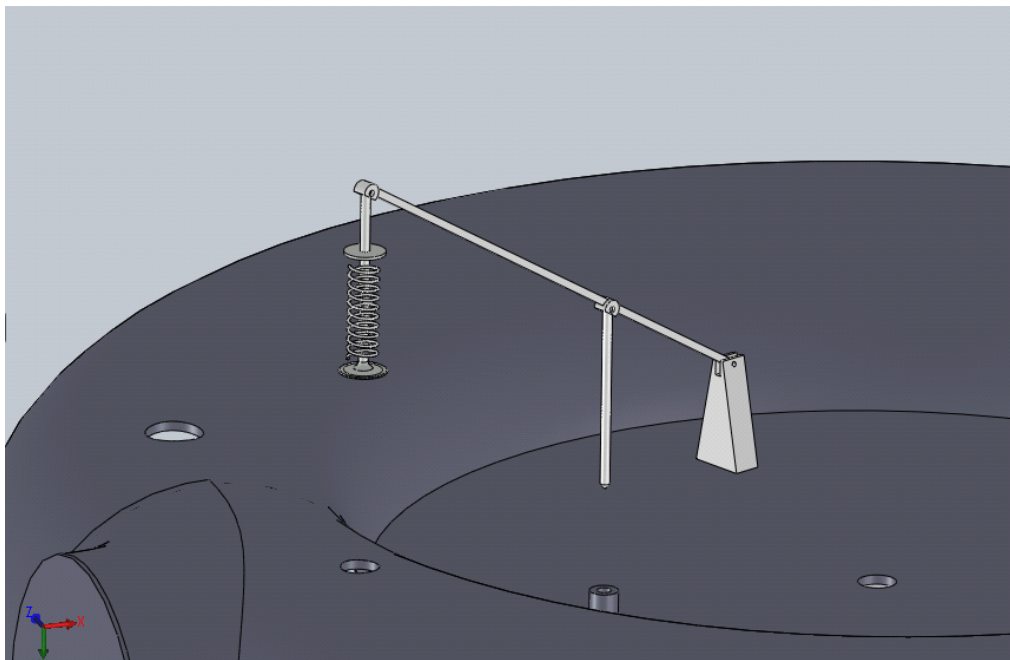
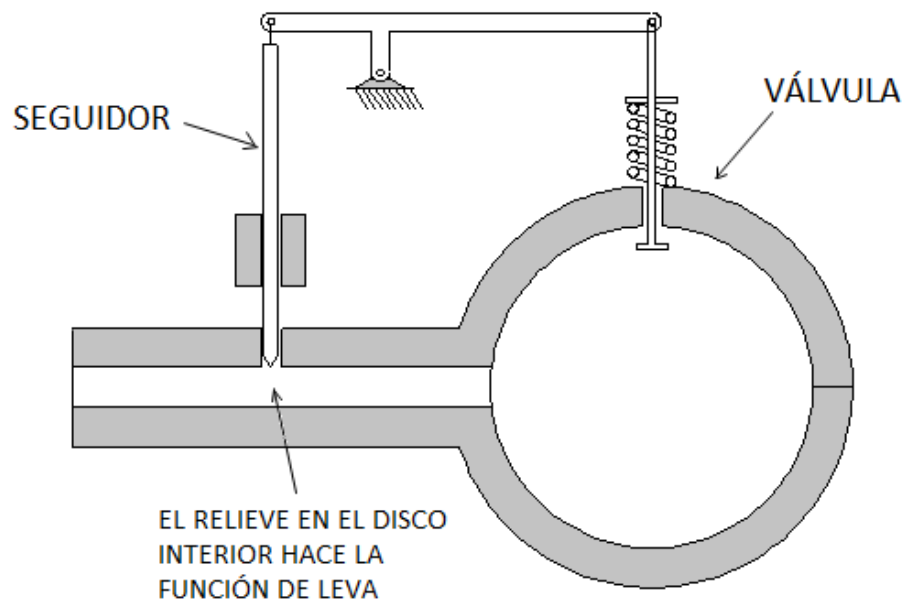
Cuando comienzan las fases de admisión y combustión, el fluido de trabajo queda encerrado entre el álabe y esta pieza, que no puede girar en sentido contrario, de forma que por esta parte la cámara de combustión queda sellada. Para que la aleta móvil deje pasar al álabe, debe abrirse completamente, es decir girar 90 grados. Es por ello que a la carcasa se le da una forma distinta en esa parte, teniendo en cuenta el hueco que necesita la aleta móvil para permitir el paso del álabe.

A continuación, detalle del rebaje y del hueco.

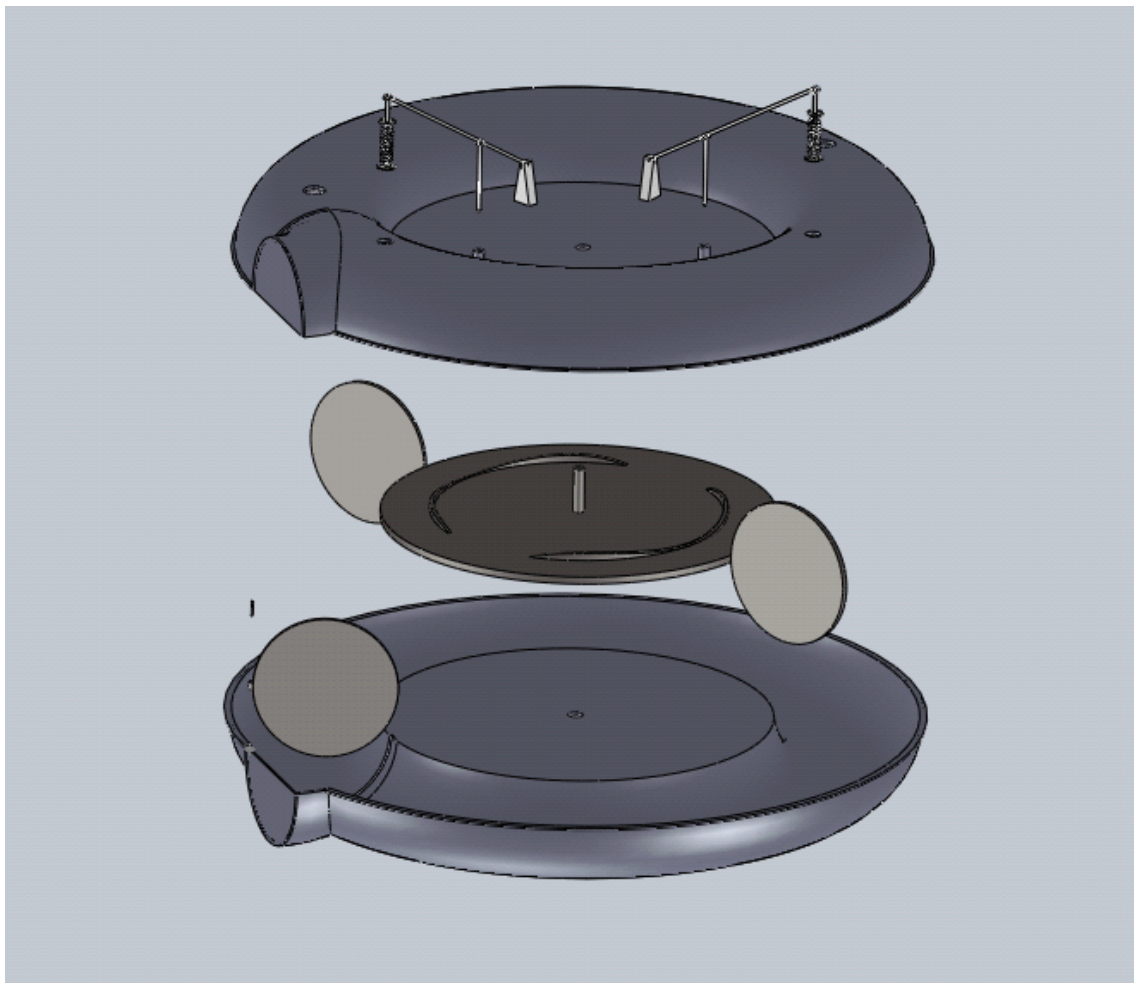


Para favorecer el sellado del toroide, se mecaniza un laberinto entre la pieza interior y las dos piezas que forman la carcasa. De esta manera se evita que el fluido de trabajo se escape cuando la presión es elevada durante la combustión, reduciendo así el rendimiento. Se podría evitar el laberinto reduciendo la tolerancia, pero así aumentaría el rozamiento entre las piezas y se tendría que tener en cuenta el calor producido y la pérdida de par útil.

En un principio se hizo este diseño para el conjunto válvula seguidor. La articulación queda situada entre la válvula y el seguidor. Para facilitar el diseño se optó por cambiar esta (la articulación) al extremo, como puede apreciarse en la segunda imagen. Se trata de un dibujo de explosión, por lo que el montaje final no coincide con el de la imagen.

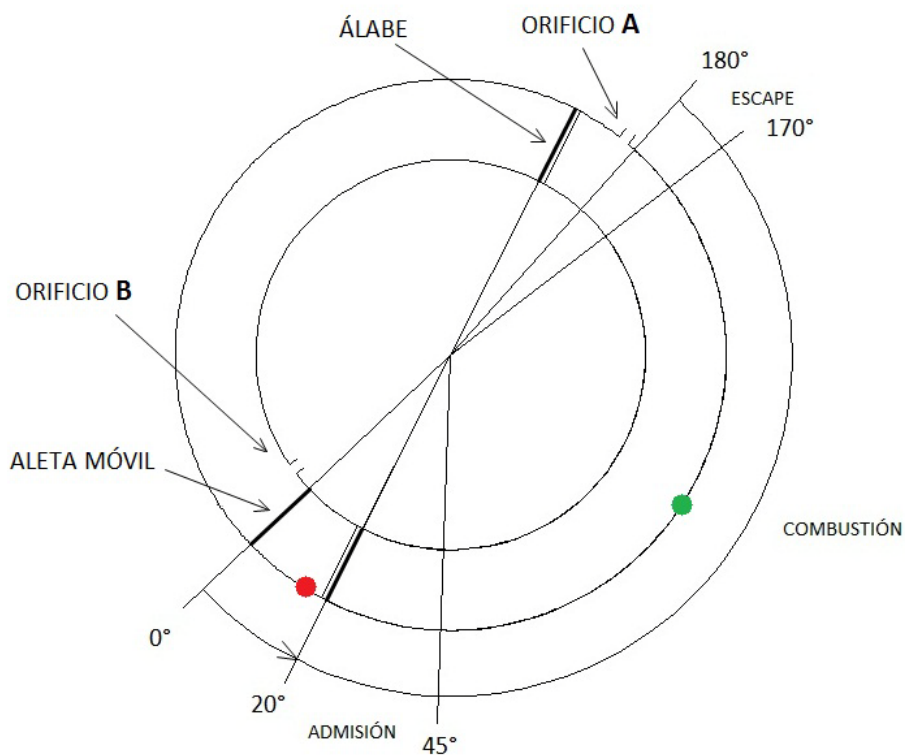


## VISTA DE EXPLOSIÓN



# FUNCIONAMIENTO

## FASES Y PROCESOS:

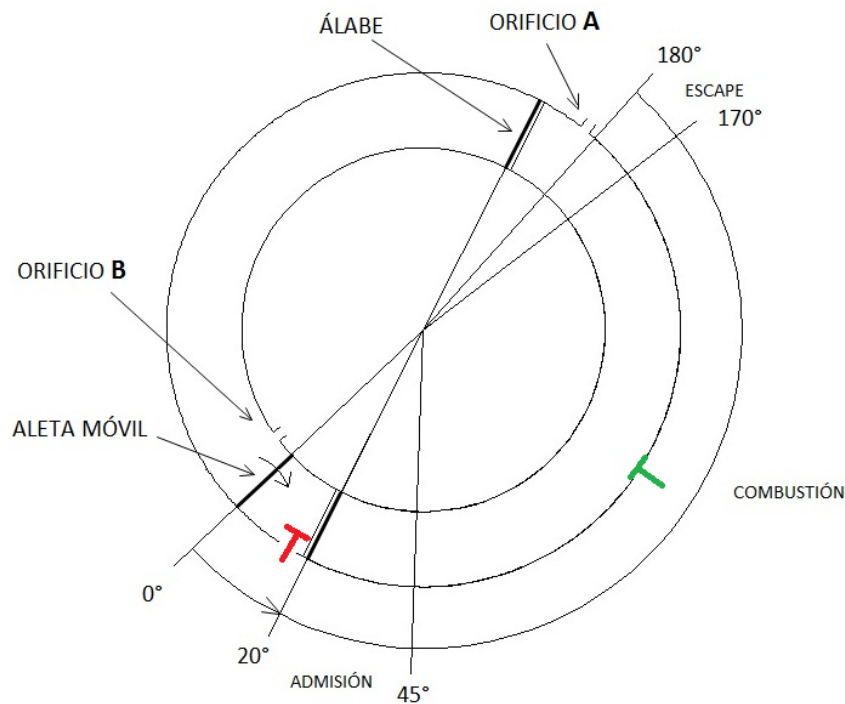


Ángulo  $\varphi$  es el que va barriendo el álabe. Su valor es nulo cuando pasa por la referencia, situada en la articulación de la aleta móvil.

Punto verde: válvula de escape. Está situada en el punto donde el ángulo  $\varphi$  toma el valor de  $100^\circ$ . Esta localización es aproximada, ya que no es determinante para un correcto funcionamiento del motor.

Punto rojo: válvula de admisión. Está situada en el punto donde el ángulo  $\varphi$  toma el valor de  $15^\circ$ .

## FASE 1: ADMISIÓN



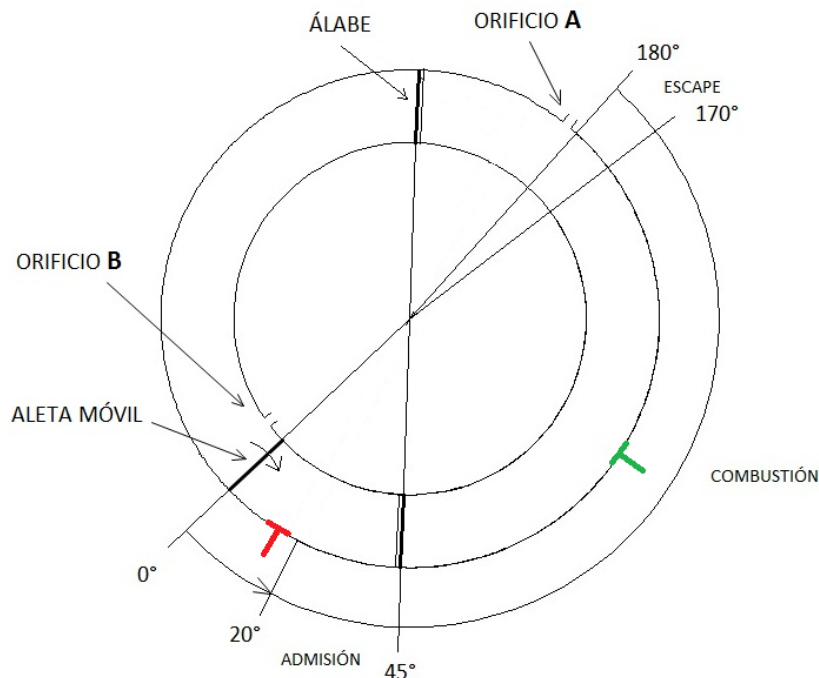
Empieza cuando el ángulo  $\phi$  alcanza el valor de  $20^\circ$ . Este fenómeno coincide con el cierre de la aleta móvil, y debe ser muy rápido para que el volumen de la cámara de combustión sea mínimo en el inicio de la admisión.

Formando la cámara de combustión entre aleta y álabe.

Si la admisión empezará antes, se perdería combustible, ya que la aleta móvil estaría aún abierta. Esta fase comienza pues cuando el álabe ha barrido  $20^\circ$  desde la referencia  $0^\circ$ , que es la línea que pasa por el centro del toroide y el bulón que amarra la aleta móvil.

La admisión acaba cuando el álabe ha barrido entre  $40^\circ$  y  $50^\circ$  desde la referencia de ángulo nulo. La duración depende de la velocidad de giro. Si esta es elevada, se genera un fenómeno de succión que absorbe más mezcla en menos tiempo, aunque por lo general, este motor funciona a velocidades de giro de valores reducidos. Por esta razón se tarda más tiempo o un mayor barrido del ángulo de barrido  $\phi$  en completar el llenado.

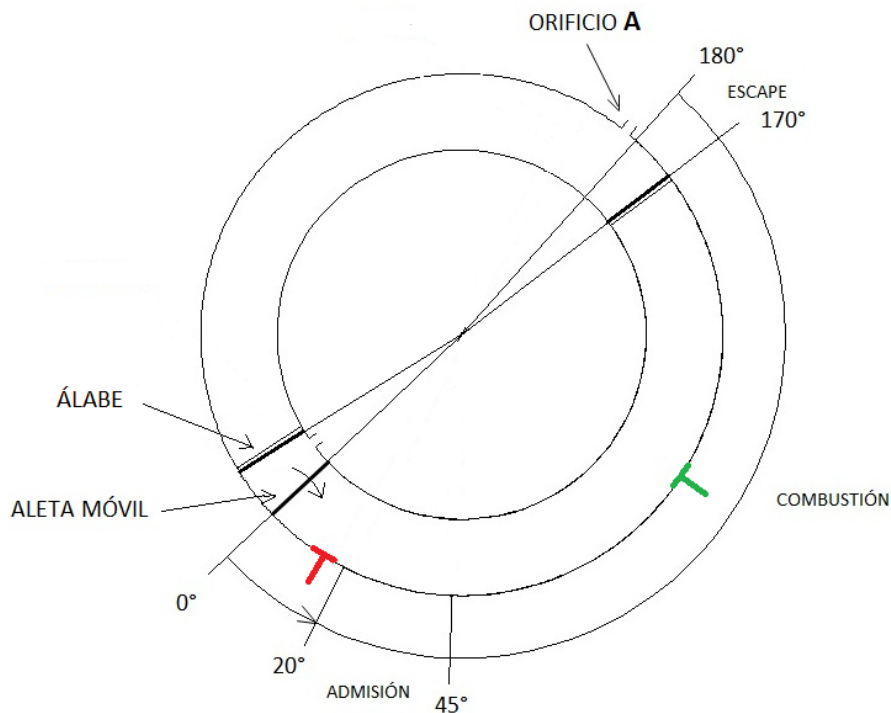
## FASE 2: COMBUSTIÓN



Esta fase dura unos  $130^\circ$  desde que cierra la válvula de admisión hasta que se abre la de escape. Dado que la aleta móvil ha alcanzado su tope y la cámara de combustión se ha sellado justo cuando empieza la admisión, cuando el fluido comience a oxidarse y a expandirse, se generará un movimiento de giro en la pieza interior debido al momento que ejerce el fluido en expansión sobre el álabe.

Cabe destacar la importancia del sellado en este tipo de motor para la obtención de un mayor rendimiento. Debido a que se utiliza una mezcla de gas y aire como fluido de trabajo, se debe asegurar la máxima estanqueidad posible en especial para la fase de la combustión.

### FASE 3: ESCAPE



Dura desde que acaba la combustión y se abre la válvula de escape hasta que la presión de la cámara de combustión se iguala a la atmosférica. En esta fase se liberan los gases resultantes de la combustión, que por estar presurizados, salen en un corto período de tiempo hasta que la presión interior se iguala a la atmosférica. por ello este proceso se realiza en lo que el álabe barre unos  $10^\circ$  aproximadamente, desde que  $\phi$  vale  $170^\circ$  hasta  $180^\circ$ , que ocurre cuando el otro álabe, hasta ahora ignorado, empieza a desplazar la alerta móvil en el punto contrario a donde acaba el escape.

Para que empiece esta fase, se supone la combustión ya acabada, o al menos la parte de la combustión que genera trabajo útil. Cuando acaba el escape de residuales, una parte de estos quedan en el interior a una presión similar a la atmosférica

### FASE 4: REGENERACIÓN

Esta fase se divide en dos, ya que se siguen expulsando gases residuales. la mayor parte de estos se expulsa en la fase anterior. El álabe realiza un barrido haciendo salir los residuales restantes por el orificio b, siendo este proceso fundamental para obtener un rendimiento aceptable.

Cuando el álabe alcanza el ángulo  $180^\circ$  acaba la fase de escape y comienza la regeneración de gases. Esta fase se divide en dos, ya que se siguen



expulsando gases residuales. La mayor parte de estos se expulsa en la fase anterior. El álabe realiza un barrido haciendo salir los residuales restantes por el orificio b, siendo este proceso fundamental para obtener un rendimiento aceptable.

Para ello la válvula de escape permanece abierta. Debido al orificio A y a que dicha válvula queda abierta, se genera en el interior del toroide una corriente que sustituye en gran medida los residuales de la combustión por aire atmosférico, que contiene entre otras cosas, comburente  $O_2$ . De esta manera se aumenta el rendimiento del motor, o más bien no se limita.

Cuanto mayor sea el orificio A, mayor será la corriente aire que barrerá los gases residuales, y por tanto, la renovación será completa o al menos mayor.

Esta fase comienza pues cuando el álabe alcanza el ángulo  $180^\circ$  y finaliza antes que el otro álabe, en el lado contrario del motor, llegue a la válvula de escape. Esto se debe a que la válvula se tiene que cerrar para dejar pasar el álabe. Esta fase comienza, en otras palabras, cuando el álabe ha pasado el orificio A, de esta forma comienza a fluir la corriente de aire.

## COLOCACIÓN DE VÁLVULAS Y ORIFICIOS

Para un mejor funcionamiento del motor, es necesaria la presencia de válvulas y orificios. Estos dos elementos tienen importantes papeles en lo relativo al fluido de trabajo, ya que permiten la entrada y salida de este al motor. la diferencia principal entre válvula y orificio, es que la primera se puede abrir o cerrar según sea la configuración de la leva, permitiendo la entrada de mezcla antes de la combustión y la salida de gases producidos en la combustión, mientras que la segunda siempre se mantiene abierta para favorecer la regeneración de residuales o evitar sobrepresión.

La válvula de admisión se sitúa a  $15^\circ$  de la referencia, por ser esta posición la más centrada posible teniendo en cuenta que la cámara de combustión recibe la mezcla desde que el álabe pasa por el ángulo  $20^\circ$  hasta que su valor alcanza aproximados los  $45^\circ$ .

La válvula de escape estará a unos  $100^\circ$  de la referencia para que pueda cumplir la fase de escape y también la de regeneración.

El orificio A permite que se regeneren los residuales que han quedado a presión atmosférica. Está colocado un poco después del ángulo  $180^\circ$  permitiendo una corriente de aire. Si los residuales quedasen dentro, el rendimiento sería menor, porque ocuparían un volumen que podrían ocupar la mezcla de aire-combustible. La corriente de aire se genera porque la válvula de escape continúa abierta.

El orificio B permite la salida de aire encerrado entre el álabe que no está en uso y la aleta móvil. Si no existiese este orificio, quedaría aire comprimida entre ambos y el motor se pararía o perdería casi todo el rendimiento.



# ELEMENTOS AUXILIARES

## COMPRESORES

Para favorecer el llenado de mezcla en el toroide se utilizarán dos compresores. Uno para aire y otro para el gas. Este último tiene una presión máxima para ser almacenado, y por motivos de seguridad, no se debe alcanzar este valor.

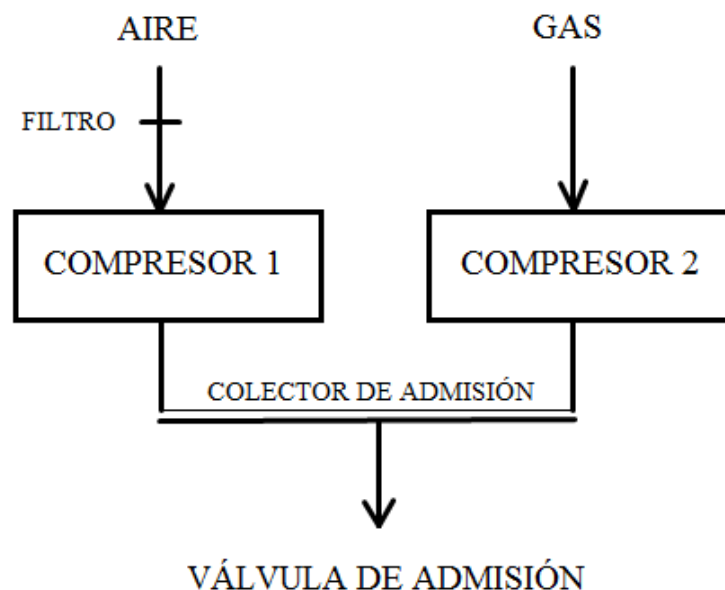
La presión de salida tanto del gas como la del aire se calcularán posteriormente. Interesa un alto caudal de aire ya que el dosado es mínimo.

La idea de presurizar combustible y comburente, es llenar la cámara de combustión lo más rápido posible para que cuando empiece la combustión, el volumen de este sea pequeño.

El compresor del aire debe ser mayor en tamaño. Se ha elegido uno de tipo biela-manivela con calderín. Entre admisiones del motor, el calderín se llena. Sería interesante un calderín de gran tamaño y presión de almacenaje, poco superior a la atmosférica. En caso contrario, consumiría más trabajo.

Para el gas en cambio, interesa un calderín de tamaño reducido, y una presión de salida similar al aire (un poco superior a la atmosférica), pero menor que la presión máxima de almacenaje característica del gas.

Esquema del sistema de admisión 1

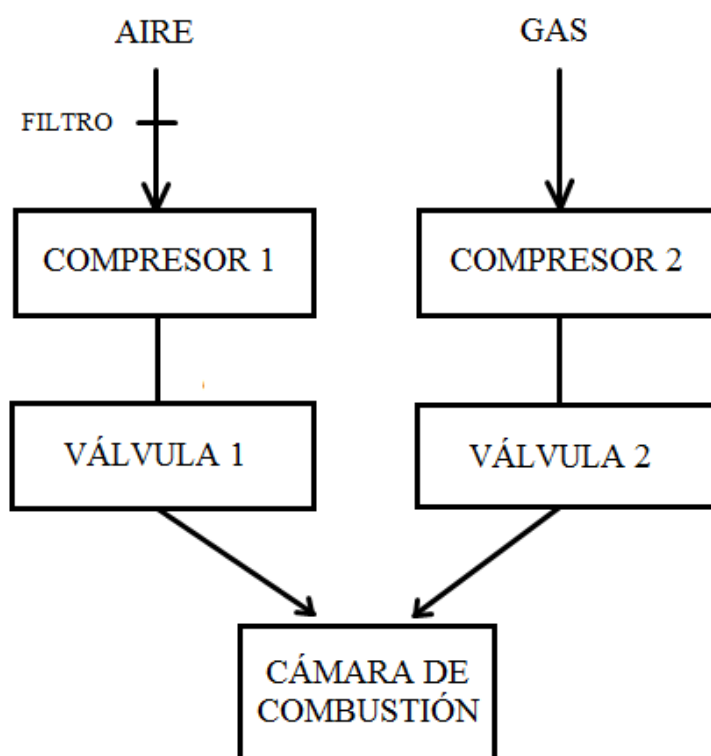


Este sistema se rechazó por motivos de seguridad. su funcionamiento se basa en un colector similar al “common rail”, donde quedan presurizados el gas y el aire. Debido a la posibilidad de recalentamiento del motor y por tanto posibles combustiones no deseadas, se renunció a esta idea.

Finalmente, como idea final del diseño, se introducirá combustible y comburente de manera separada, mediante dos válvulas que tengan un diseño que favorezca la mezcla de ambas. De esta manera, se evita tener un colector presurizado y los posibles accidentes que acarrearía.

Es de vital importancia considerar la presión máxima a la que puede almacenarse el gas, para establecer la presión de entrada al toroide sin riesgos.

Dibujo de esquema de admisión 2 (definitivo)



## VÁLVULAS

Se utilizan las mismas que ya se consideran en la tesis de maestría que ha servido apoyo principal por ser elementos que no afectan de manera significativa al rendimiento general del motor. Al tener válvulas iguales, las fórmulas que determinan su comportamiento de forma matemática son las mismas.

Estas son válvulas de asiento, y son las más comunes para la utilización en motores de combustión por su geometría y costo. Es por su apertura por donde se inyectará la mezcla de aire y gas.

La curva de la leva también será idéntica. La idea es simplificar los cálculos. Esta característica es muy importante, ya que el funcionamiento del motor depende totalmente de factores como el tiempo de llenado de la cámara de combustión, flujo másico de combustible o comburente, etc... a nivel constructivo, será recomendable aplicarle un tratamiento de nitruración. El objetivo es aumentar su dureza superficial, pero principalmente mejorar su resistencia a la oxidación, ya que la válvula es una de las piezas que mayor temperatura alcanzan.

Se consideró como alternativa un sistema de varios inyectores de gas que favoreciera la mezcla, pero resulta más complicado, aunque los resultados obtenidos serían mejores a nivel de rendimiento general del motor.

## MATERIALES UTILIZADOS Y ESTADO SUPERFICIAL

### MATERIALES UTILIZADOS

Debido a la necesidad de tener un buen sellado entre los álabes de la pieza interior y la carcasa en la que están encerrados, se utilizará un acero aleado que sufra la mínima dilatación posible. Interesaría que fuese fácil de mecanizar, debido a las formas difíciles de conseguir. Tras la mecanización se le daría un tratamiento térmico para dotar de mejores propiedades a la pieza. También sería necesario aplicar un tratamiento superficial. De esta forma se evitará la oxidación, ya que esta superficie estará sometida a altas temperaturas y rodeada de una atmósfera de posibles reactivos. El tratamiento a llevar a cabo sería la

nitruración, que pese a ser más costosa permite obtener mejores resultados, ya que la cementación sólo aumenta la dureza superficial y no reduce la oxidación.

Por ser las válvulas las piezas que resisten mayores temperaturas, se ha de considerar un acero que resista la erosión. También se le aplicará un tratamiento superficial. El ideal sería nitrurar su superficie por las mismas razones.

Otras piezas como el seguidor, los conductos de admisión y escape se construirán de un material de menor costo que pueda resistir las condiciones de trabajo y mayor facilidad de manipulación. Posiblemente la mejor elección sería una aleación de estaño o una fundición de alto contenido en carbono.

Los elementos poliméricos quedarán reducidos a ser utilizados en conductos de combustible, comburente o residuales.

## ESTADO SUPERFICIAL

Esta parte del diseño, por ser de ámbito constructivo y productivo se estudiará de manera aproximada. El estudio de estos aspectos, facilita en gran medida la comprensión del funcionamiento del motor para el lector.

Las partes del motor que requieren un estado superficial son el interior del toroide, tanto en la carcasa como en el álabe. El disco central de la pieza interior, que actúa como volante de inercia, también debe tener una superficie pulida, que además tendría una película de lubricante que facilite el giro.

Cuando la aleta cierra formando la cámara de combustión, se debe obtener un sellado del 100%, perdiéndose en caso contrario gran parte del rendimiento de forma innecesaria. La corona superficial donde se apoya la aleta móvil debe tener una tolerancia geométrica de planicidad reducida.

De igual manera, ocurre con las válvulas y las superficies donde se apoyan cuando estas están cerradas.

# COMBUSTIBLES Y DOSADO

## FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

Este motor tiene algunas características constructivas y de diseño asociadas a su funcionamiento. Por ejemplo, el tipo de combustión que en él se lleva a cabo, consiste en oxidación de gas, sólo permite una velocidad de giro reducida.

La pieza interior, que convierte la energía térmica del fluido en energía mecánica, tiene mucha masa para hacer la función de volante de inercia. Esto hace que sea más conveniente que se utilice una combustión no violenta. Es por ello, que se ha elegido gas de tipo LP o alguno de comportamiento similar, y aire atmosférico como comburente. Si la elección fuese mezcla de gasolina-aire, no se optimizaría el rendimiento ya que la expansión de este fluido es mucho más pronunciada

### Demostración

El momento es una función que depende del tiempo, teniendo en cuenta que la presión (P) de la mezcla en expansión varía en función del tiempo. Esto se puede observar en las gráficas de las combustiones de gas y gasolina. El área del álabe (A) y la distancia del centro de este al eje (d) tienen valores constantes.

$$M = f(t) = P A d$$

Tomando la segunda ley de newton, en su forma para calcular momentos

$$I\alpha = \sum M \quad [\text{Kgm}^2/\text{s}^2]$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum M$$

$$I \int d\omega = \int (\sum M) dt$$

Dado que I es constante

$$I \int_0^{\omega} d\omega = \int_0^t f(t) dt$$

Despejando la velocidad angular instantánea

$$\omega(t) = \frac{\int_0^t f(t) dt}{I}$$

Tenemos que el área entre la función del momento y las abscisas para un valor de tiempo transcurrido es

$$\int_0^t f(t) dt = A$$

Este valor crece de manera muy rápida en el caso de la gasolina, y tras alcanzar su máximo valor, comienza a decrecer.

El momento de inercia de la pieza interior (I), es directamente proporcional a la masa de esta. A mayor masa, mayor momento de inercia, y por tanto, mayor dificultad va a tener el motor para desplazar el álabe, y transformar la energía de la mezcla en expansión, en energía mecánica en el eje

En cambio, en el caso del gas, el área va creciendo poco a poco, por ello la velocidad angular es más constante. Para un valor de momento de inercia (I) elevado, se considera que la velocidad  $\omega$  sea más constante todavía. Esto hace que la velocidad se reduzca, aunque obteniéndose un par de mayor magnitud. Las características del motor son pues una velocidad de giro reducida y necesariamente constante, ya que no resulta eficiente si se varía el régimen de revoluciones, y un par de salida elevado. Es esta razón, por la que la aplicación ideal para este tipo de motor es la generación eléctrica.

Se obtiene que a mayor valor de I (momento de inercia de la pieza interior), más constante es la velocidad de giro  $\omega$ . Por esta razón se utiliza gas como combustible

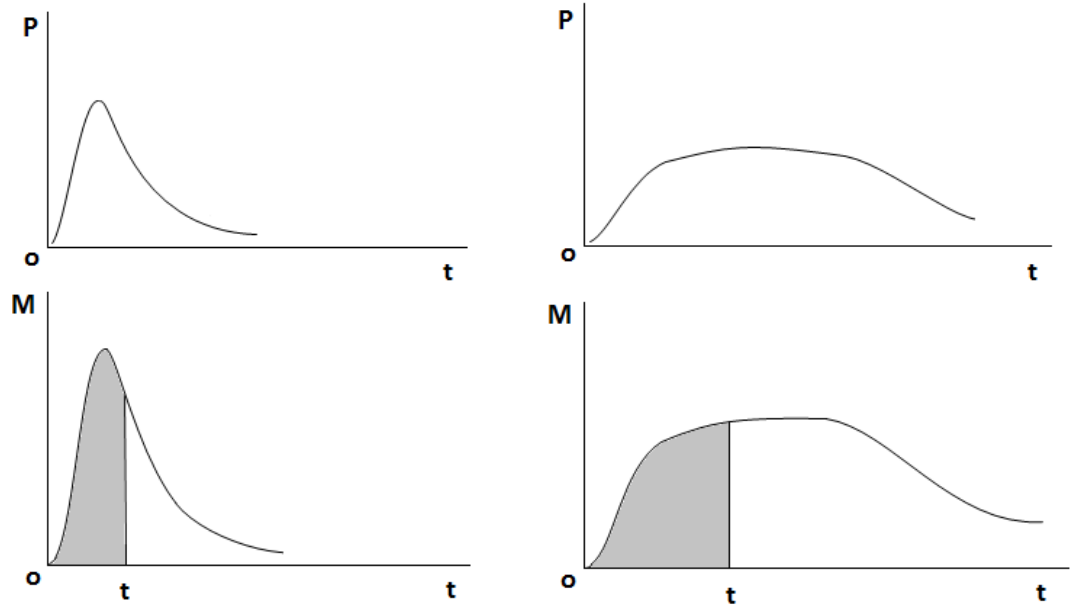
El aumentar el peso de la pieza interior, va a provocar un aumento del rozamiento de la misma con la carcasa sobre la que descansa. Pero con una buena lubricación, el rendimiento general seguirá siendo mejor.

Se consideró trabajar con vapor como fluido de trabajo, pero debido a que su expansión resulta más lenta, se abandonó la idea.

La utilización del diesel no sería posible por la necesidad de compresión.

De manera esquemática, se analizarán los distintos tipos de combustión según sea el combustible utilizado. Se considerará por una parte la presión que alcanza la mezcla (el fluido de trabajo) durante la combustión y por otra parte el tiempo desde que se produce la chispa (es aproximado)

## Gráficas



La presión alcanza un mayor valor con gasolina, pero con gas se obtiene un valor más constante del momento ejercido sobre el álabe, que es el responsable de que se obtenga movimiento en el eje. La presión es menor, pero el tiempo de aplicación es mayor.

El dosado a utilizar será el más apropiado según las necesidades o aplicación. Estará comprendido entre 1/50 y 5/50. Estos valores son los más utilizados en turbinas de gas.

# CAPÍTULO II

## CONSIDER. TEÓRICAS Y DE CÁLCULO

### ESTUDIO ENERGÉTICO

Según el ciclo que se esté desarrollando el sistema genera o recibe energía en forma de trabajo o energía interna.

ADMISIÓN  $W < 0$

Se introduce gas y aire a presión y se aprovecha la succión que se produce en la cámara de combustión.

Para introducir la mezcla se necesitan compresores. Por lo que el motor consume energía

EXPLOSIÓN-EXPANSIÓN  $W >> 0$

Mediante una chispa, se inicia la combustión y expansión del fluido de trabajo, que aire y gas en combustión. Esta fase es la que produce energía en forma mecánica por el movimiento del álabe.

ESCAPE  $W < 0$

Los gases residuales salen por la válvula de escape por la diferencia de presiones entre el interior y exterior, aunque se trata de trabajo aportado al sistema.

REGENERACIÓN  $W < 0$

El gas residual entre los dos álabes donde tuvo lugar la combustión se regenera con aire atmosférico mediante dos orificios (el orificio a y la válvula de escape)

El gas residual remanente se encuentra a una presión similar a la atmosférica.

Como conclusión, se aprecia que sólo uno de los ciclos es el que genera energía en forma de trabajo. Por esta razón es recomendable hacer que la pieza interior haga la función de volante de inercia dándole más masa.



# ESTUDIO DE PÉRDIDAS

Debido a la idealización del proceso, se van a simplificar gran parte de las pérdidas que tiene lugar en el motor, y con ello los complejos cálculos que conllevan.

Parte de la energía que el combustible puede generar, se pierde ya sea en la porción de este que no se oxida, pérdidas por entropía o internas. A la parte de la energía mecánica que se obtiene en el eje, se le debe quitar la necesaria para mover el compresor, expulsar los gases residuales, y formar la corriente para la fase de regeneración. De igual manera, se debe tener en cuenta el rozamiento que frena el movimiento del eje. Para establecer unos valores, se realizará un estudio comparativo del poder calorífico aproximado que puede tener la mezcla, teniendo en cuenta las posibles pérdidas antes mencionadas, y ver cuál sería el rendimiento final y el trabajo útil obtenido en el eje.

Para la comparación matemática de ambos motores, se ha elegido el modelo de llenado vaciado. Este es válido siempre que se desprecien fenómenos como la fricción. sí se tendrá en cuenta el momento de rozamiento contrario al generado por la expansión del gas. Este momento se producirá en las superficies del disco interior con la carcasa y de una mayor magnitud en la parte de los álabes con la superficie del toroide.

En caso de continuar en el futuro con el estudio de manera más profunda, el rendimiento teórico obtenido se debe multiplicar por un coeficiente de reducción aproximado que tenga en cuenta el rozamiento y las pérdidas mecánicas. Este rendimiento también se reduce considerando la proporción de mezcla que no ha reaccionado y las pérdidas internas. Para obtener estos coeficientes, se utilizarán algunos de motor alternativo.

Las mayores pérdidas se producirán por el compresor y por parte de mezcla no reaccionada y pérdidas internas. El rozamiento también tendría importancia, y en último lugar el escape y la regeneración de gases.

# CAPÍTULO III

## ANÁLISIS MATEMÁTICO

### EC. FUNDAMENTALES EN EL ESTUDIO DE FUNCIONAMIENTO

#### ECUACIONES BÁSICAS

Las ecuaciones con mayor relevancia a nivel analítico, serán las que conciernen una base para cualquier estudio termodinámico por ser válidas de forma general. Estas son las ecuaciones de continuidad y de la energía. Cabe destacar, de igual manera los principios de la termodinámica por ser aptos para todo estudio ya que se caracterizan por ser generales para todos los casos.

No se busca la exactitud en los cálculos, sino el hecho de hallar un camino matemático acertado para tratar de prever el funcionamiento del motor.

Ec. de continuidad

$$dm_{vc}/dt = m_a - m_e$$

Primer principio de la termodinámica

$$\delta Q = \delta E_{vc} + h_e \delta m_e - h_a \delta m_a + P_{vc} \delta V_{vc}$$

Donde los subíndices a y e representan admisión y escape respectivamente. Ec. de la energía (integrando la anterior)

$$Q = (\delta E_{vc}/\delta t) + h_e m_e - h_a m_a + P_{vc}(\delta V_{vc}/\delta t)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} + \sum_j \frac{dH_j}{dt} \quad (\text{en otra forma})$$

## EXPRESIONES COMUNES PARA LOS DOS DISEÑOS

Otras ecuaciones de gran importancia son las que no son función de parámetros geométricos del motor. En otras palabras, son las mismas para el motor alternativo y el diseño en estudio.

La ley de los gases ideales, es útil para el estudio, pero se debe tener en cuenta que es una aproximación al comportamiento real de los gases. Es fundamental para poder relacionar los valores de variables tales como la presión, temperatura y volumen en los diferentes estados o entre procesos termodinámicos.

### LEY DE LOS GASES IDEALES

$$PV=nRT$$

### FLUJO MÁSICO

$$m = (A_m P_{vc})/a * f(P_{vc}/P_e)$$

$A_m$  es el área mínima de paso del fluido,  $a$  es la velocidad del sonido en el aire y  $p_e$  es la presión en la entrada de la válvula.

Se ha de tener en cuenta que los valores de  $p_{vc}$  y  $p_e$  son las presiones interior y exterior de la válvula respectivamente para el motor en estudio.

Por ejemplo en este caso,  $A_m$  depende de la geometría de la válvula, por lo cual no necesita ser sustituida. En cambio sí se debe tener en cuenta los valores de las presiones, ya que sí varían para los dos motores.

### TRANSFERENCIA DE CALOR

$$Q = hA_w(T_w - T_{vc})$$

Donde  $A_w$  y  $T_w$  son los valores de temperatura y área en la superficie de control, y  $h$  el coeficiente convectivo de la transferencia energética. La variable  $t_w$  tiene un valor similar pero menor a la temperatura en el volumen de control. Si el coeficiente convectivo fuese infinito, sus valores serían iguales.

En el caso de  $a_w$ , se debe tener en cuenta que su valor cambia como el del volumen, en función del ángulo recorrido por el álabe. Para calcular esta superficie, lo ideal es recurrir al teorema de Guldin, calcular la superficie toroidal

recorrida, y añadirle la superficie del álabe y de la aleta móvil. El coeficiente convectivo  $h$  se calcula de la siguiente forma:

$$h = 129,8B^{-0,2}P^{0,8}u^{0,8}T^{-0,55}$$

Donde  $P$  y  $T$  son los valores de presión y temperatura instantáneas dentro de la cámara de combustión,  $B$  es el diámetro, que puede ser el mismo valor que el diámetro del toroide por su analogía geométrica, y  $u$  es la velocidad característica del fluido que se calcula de igual manera para ambos motores, ya que la ecuación que describe esta variable, depende de valores de volumen, temperatura y presión paramétricos y de referencia. También se ven involucradas dos constantes que toman unos valores diferentes, sugeridos por Woschni, según sea la fase en la que se encuentra el motor. Para poder utilizar estas expresiones en el motor rotativo, se deberá suponer valores para estas constantes de forma que el resultado sea aproximado y coherente, o partir con los mismos valores, siempre y cuando los resultados sean de igual manera válidos.

### PROPIEDADES DE LOS GASES

Tanto para la mezcla de aire combustible como para los gases producidos en la combustión, los valores del calor específico para volumen y presión constante dependen de la temperatura. Sin embargo, en el caso de los residuales, también depende de la proporción de combustible aire  $X_{af}$

$$X_m = m_{a,vc}/m_{vc} = (X_{sto} - X_{af})/(1 + X_{af})X_{sto}$$

Donde el subíndice (af) se refiere a la fracción de aire combustible, y (sto) a la mezcla estequiométrica de la mezcla.

Para el cálculo de la energía interna del fluido, se recurre la ecuación de Krieger y Borman. Se obtiene a partir de la aproximación de coeficientes polinomiales, dependientes de la temperatura. Esta fórmula se obtuvo, con gas metano, por lo que se obtiene mayor exactitud para el motor rotativo diseñado.

$$u = K_1(T) - K_2(T)$$

Para calcular la constante de los gases  $r$ , se ha de tener en cuenta que depende del valor de la relación equivalente de la mezcla ( $\phi$ ), por ello se ha de sustituir por su valor en el motor rotativo.

$$R = 0,287 + 0,02\phi$$

En el caso de las características del combustible o de presión entre otras, se puede utilizar las mismas fórmulas siempre y cuando se sustituya alguna de esas variables o parámetros que sí cambian para ambos motores, por ejemplo para la ley de variación del volumen de la cámara de combustión. Para estos casos se podrá sustituir algunas variables o parámetros de la ecuación por sus valores en el motor rotativo. Se trata de hallar las ecuaciones y principios matemáticos mediante los cuales se pueda analizar el motor diseñado, a partir de las ecuaciones que tienen este fin para los motores alternativos.

### LEY DE COMBUSTIÓN

Para calcular la combustión se necesita obtener el valor de los intervalos de la ley de quemado (a, b y c) que se obtienen de forma experimental. Sin embargo, debido a que no existe un prototipo del motor, se deben suponer sus valores, de manera aproximada y partir los cálculos desde aquí.

Para empezar, se debe conocer la fracción de masa ( $m_{fq}$ ) de combustible que ha sido quemada. De esta forma se obtiene el valor de la energía liberada.

$$m_{fq} = \beta f_1(t) + (1 - \beta) f_2(t)$$

$\beta$  es el factor de proporcionalidad de cambio de fase total de quemado premezclado. Su valor depende de los intervalos de la ley de quemado (parámetros a, b y c), ID, que es el tiempo de retraso de la combustión, y por último de ( $\phi$ ) que es la relación equivalente de la mezcla. Para estos dos últimos parámetros, se ha de tener en cuenta que su valor es diferente para el motor rotativo.

$$\beta = 1 - a\phi^b / ID^c$$

Las ecuaciones  $f_1(t)$  y  $f_2(t)$  no dependen de variables, sino de parámetros, por lo que sólo se debe sustituir su valor por el que adopta en el motor rotativo, y no la ecuación de cada una de ellas.

### FLUJO A TRAVÉS DE VÁLVULAS

En el caso de las ecuaciones que tienen que ver con la geometría de las válvulas y flujos de mezcla o residuales que las atraviesan, no se va a tener que cambiar nada, ya que las válvulas utilizadas en el motor rotativo se suponen idénticas a las utilizadas en motores alternativos. Por ser geométricas, y relacionar sólo dimensiones y ángulos, no afecta a otras variables ni fórmulas.

Por ello variables como área mínima o diámetro promedio, que aparecen en otras ecuaciones, no deben sustituirse. Según el estado en el que se encuentra la válvula, se van a separar el proceso en tres partes diferentes de levantamiento

para su estudio por separado. Según el estado en el que se encuentre la válvula, el área mínima se calculará de una forma o de otra.

En el primer caso,

$$A_m = \pi L_v \cos \beta (D_v - 2\omega + (L_v/2) \sin 2\beta)$$

En el segundo caso,

$$A_m = \pi D_m ((L_v - \omega \tan \beta)^2 + \omega^2)^{1/2}$$

Y por último en el tercer caso

$$A_m = (\pi / 4)(D_p^2 - D_s^2)$$

## ECUACIONES A SUSTITUIR

Son las ecuaciones que describen el funcionamiento del MCIA, en las cuales se van a sustituir algunas variables geométricas, de estado, etc.. para llegar a un análisis del motor rotativo diseñado.

Como ayuda para la obtención de las variables volumen y superficie de la cámara de combustión, se utilizará un teorema que permita despejar las variables que nos interesan de una forma sencilla y analítica:

-Teorema de Guldin

Sirve para calcular el volumen de la cámara de combustión en el motor en estudio. Este volumen es el que queda encerrado entre el álabe y la aleta móvil. Se ha de tener en cuenta que tiene un valor inicial cuando empieza la admisión, y va creciendo en función del ángulo recorrido por el álabe.

$$V_o = R^2 \alpha * 2\pi r$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo recorrido por el álabe

El valor inicial de este volumen es el que recorre el álabe en lo que tarda en desplazar la aleta móvil y que esta vuelva a quedarse cerrada. Es el correspondiente a 20° de giro. En radianes son  $(\pi/9)$ . Según el teorema de Pappus Guldin, el volumen encerrado en 20° es

$$V_o = R^2 (\pi/9) * 2\pi r$$

Este es el volumen inicial. A partir de este valor, la cámara de combustión se expande. El volumen total es la suma del volumen inicial y del variable

$$V_T = V_o + V(t)$$

El volumen variable se expresa de la siguiente forma

$$V(t) = R^2 \alpha(t) * 2\pi r$$

Teniendo en cuenta que la velocidad angular  $\omega$  es igual al ángulo recorrido entre el tiempo que ha tardado en hacerlo:

$$\Omega = \alpha(t)/t$$

Despejando el ángulo y sustituyendo en la ecuación del volumen variable

$$V(t) = R^2 \Omega(t) * t * 2\pi r$$

t es el valor del tiempo a partir del cierre de la válvula de admisión, o sea, cuando empieza la combustión.

Para calcular el área de la cámara de combustión  $A_w$  se procede de manera similar. el área total sería la recorrida por el álabe (superficie toroidal), mas la suma de las áreas de la aleta móvil y el álabe. Según el teorema de Guldin Pappus, el área toroidal sería

$$A = R \alpha(t) * 2\pi r$$

Sustituyendo la velocidad angular y el tiempo, quedaría

$$A = R \Omega(t) * t * 2\pi r$$

El área total de la cámara de combustión sería

$$A_T(t) = 2(\pi r^2) + A(t)$$

Donde R será el radio exterior del toroide (alrededor del eje de giro), y r el radio interior.

# **CAPÍTULO IV**

## **CONCLUSIONES**

Se espera obtener un rendimiento elevado, ya que los principios de funcionamiento del motor diseñado son similares a los de los motores de combustión comunes. En algunas características ambos diseños difieren, por ejemplo en el rozamiento o la forma de llenado de la cámara de combustión, por lo que este rendimiento disminuya en relación al obtenido por los motores eb general, pero sea todavía elevado para que el diseño sea viable tanto funcional como económicamente. La idea es conseguir que el motor en estudio sea un producto competitivo en el mercado de máquinas térmicas.

El diseño podría utilizarse en diferentes aplicaciones, pero principalmente en generación eléctrica. Esto se debe a que las características de funcionamiento del motor se adecúan a estas necesidades. El motor genera un par elevado a bajas revoluciones, pero resulta ineficiente si cambia su régimen de funcionamiento. Por ello no se puede utilizar en otras aplicaciones.